



|                  |   |
|------------------|---|
| Title            | 内燃機関における燃焼特性とトルクハーモニクスとの相互関係  |
| Author(s)        | 李, 文哲; Li, Wen-Zhe; 宮本, 登 他   |
| Citation         | 北海道大學工學部研究報告, 168, 1-9  |
| Issue Date       | 1994-02-21  |
| Doc URL          | <a href="https://hdl.handle.net/2115/42417">https://hdl.handle.net/2115/42417</a> |
| Type             | departmental bulletin paper   |
| File Information | 168_1-10.pdf  |



## 内燃機関における燃焼特性と トルクハーモニクスとの相互関係

李 文哲\* 宮本 登\*\*

(平成 5 年 10 月 4 日受理)

### Relationship between Combustibility and Torque Harmonics in Internal Combustion Engines

Wen-Zhe LI and Noboru MIYAMOTO

(Received October 4, 1993)

#### Abstract

This paper investigates characteristics of torque harmonics related to combustibility and in-cylinder pressure variations in internal combustion engines.

The result of the investigation indicated that lower frequency torque harmonics, below 2-orders of the engine revolution were governed mainly by the indicated mean effective pressure rather than by combustibility or the behavior of the combustion rates. Higher frequency torque harmonics, above 2.0 or 2.5-orders, were somewhat affected by combustibility and showed a stronger positive correlation to maximum cylinder pressures.

However, the retardation of ignition timings and increases in combustion duration resulted in a slight increase in the lower frequency harmonics in spite of the small increased indicated mean effective pressures, and the decrease in the higher frequency harmonics.

#### 1. ま え が き

内燃機関においては、間欠燃焼に伴うトルク変動が駆動系のねじり振動および騒音等に対する加振源として作用する。特にねじり振動については、機関単体あるいはそれを含む駆動系の固有振動数と機関のトルク変動中の周波数成分とが共振すれば、振動あるいは騒音が増加するのみならず、クランクシャフト等の駆動系要素の破損を招くこともある。

共振を避けるために、通常駆動系の剛性向上、シリンダー径の縮小あるいはダンパーの設置等がなされてきたが、機関のトルク変動からの積極的な対応も状況に応じては必要である。

内燃機関の中でも、高速ディーゼル機関はその加振振動数ならびに燃焼圧力が一般に高いため、ねじり振動に対する配慮が必要である。この種の機関では、昨今その高性能化と低エミッション化を更に進めるために、高度な燃焼率の制御あるいは着火時期の遅延などが試みられているが、その際トルク変動の点からも検討・配慮の必要があろう。

本研究では、ディーゼル機関の燃焼圧力に起因するトルクハーモニクスに注目し、それと各種燃焼条件との関係を明らかにすると同時に、筒内圧力経過、即ちインジケータ線図の形状特性

\* 東北農業大学 (中国・ハルビン市)

\*\* 北海道大学工学部機械工学科

値との相関についても解析し、機関の燃焼特性がトルクハーモニックスに及ぼす影響について系統的な解明を試みた。

## 2. 圧力経過とトルクハーモニックスの計算

記号

|                                  |                      |
|----------------------------------|----------------------|
| C : 比熱                           | D : シリンダー径           |
| G : ガス重量                         | k : 比熱比              |
| l : コンロッド長さ                      | M : Wiebe 燃焼関数の形状特性値 |
| n : 一サイクルの次数                     | N : 機関回転の次数 (=n/2)   |
| P : 圧力                           | Q : 熱量               |
| r : クランク半径                       | S : ハーモニックス成分        |
| T : 温度, トルクとしては時期                | V : 容積               |
| $\epsilon$ : 圧縮比                 | $\theta$ : クランク角度    |
| $\lambda$ : 連かん比 (l/r) もしくは空気過剰率 |                      |
| サフィックス                           |                      |
| b : 燃焼                           | c : 冷却               |
| e : 排気                           | f : サイクル当たりの燃料量      |
| h : 行程                           | i : 吸気もしくは図示         |
| ig : 着火時点                        | m : 平均               |
| n : 次数                           | p : 定圧               |
| w : 壁面                           | z : 燃焼終点             |

本計算では以下の仮定を置く。

- 1) シリンダー内のガスは半完全ガスとする。
- 2) 燃焼率は Wiebe の燃焼関数による。
- 3) 燃焼室壁面温度は一定とする。
- 4) 吸気及び排気の圧力と温度は一定とする。

シリンダー内の圧力 P については熱力学第 1 法則より次式が与えられる。

$$\frac{dP}{d\theta} + k \frac{P}{V} \frac{dV}{d\theta} = (k-1) \frac{d\phi}{d\theta} \frac{1}{V} \quad (1)$$

$$\text{ここで, } \frac{d\phi}{d\theta} = \frac{dQ_b}{d\theta} + \frac{dQ_c}{d\theta} + C_{pi} T_i \frac{dG_i}{d\theta} + C_{pe} T_e \frac{dG_e}{d\theta} \quad (2)$$

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 r \left[ 1 - \cos\theta + \lambda \left\{ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{\sin\theta}{\lambda} \right)^2} \right\} \right] + \frac{V_h}{\epsilon - 1} \quad (3)$$

$\frac{dQ_b}{d\theta}$  は以下のような Wiebe の燃焼関数<sup>(1)</sup> を用いた。

$$\frac{dQ_b}{d\theta} = 6.9 \cdot Q_0 \frac{M+1}{\theta_0} \left( \frac{\theta}{\theta_0} \right)^M e^{-6.9 \left( \frac{\theta}{\theta_0} \right)^{M+1}} \quad (4)$$

$\frac{dQ_c}{d\theta}$  は Woschni の式<sup>(2)</sup> に,  $\frac{dG_i}{d\theta}$  および  $\frac{dG_e}{d\theta}$  は著者らの既報<sup>(3)</sup> に, また比熱比は J. Reisa-

cher の式<sup>(4)</sup> にそれぞれよった。

燃焼圧力トルク  $T(\theta)$  は、(1)式から得られる  $P(\theta)$  から次式のように求められる。

$$T = P \frac{\pi}{4} D^2 r \sin\theta \left[ 1 + \frac{\cos\theta}{\lambda} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sin\theta}{\lambda}\right)^2}} \right] \quad (5)$$

ここで、 $T' \equiv \frac{T}{\frac{\pi}{4} D^2 r}$  と置けば、

$$T' = P \sin\theta \left[ 1 + \frac{\cos\theta}{\lambda} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sin\theta}{\lambda}\right)^2}} \right] \quad (6)$$

すなわち、通常の燃焼圧力トルク  $T$  を  $T'$  として表現することにより、トルクをシリンダー内圧力に対応させて表示できると同時に、シリンダー径の異なる機関のトルクも容易に把握あるいは推定し得る。

$T'$  の各周波数成分、すなわち  $n$  次のトルクハーモニックス  $S_n$  は以下のように示される。

$$S_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad (7)$$

$$\text{ここで、} A_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{4\pi} T'(\theta) \cos\left(\frac{n}{2}\theta\right) d\theta \quad (8)$$

$$B_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{4\pi} T'(\theta) \sin\left(\frac{n}{2}\theta\right) d\theta \quad (9)$$

なお、トルクのフーリエ展開は次のとおりである。

$$T' = \frac{1}{2} A_0 + \sum \left[ A_n \cos\left(\frac{n}{2}\theta\right) + B_n \sin\left(\frac{n}{2}\theta\right) \right]$$

$$A_0 = \frac{1}{\pi} P_{mi}$$

この場合、4 サイクル機関を対象にしたので、 $n=1$  は機関回転の次数  $N = \frac{1}{2}$  次に対応するハーモニックスとなる。

一方、 $P(\theta)$  から図示平均有効圧  $P_{mi}$  と図示熱効率  $\eta_i$  は次式によった。

$$P_{mi} = \frac{1}{V_h} \int P(\theta) \frac{dV}{d\theta} d\theta, \quad \eta_i = \frac{P_{mi} V_h}{Q_f}$$

今回モデルとした機関の寸法等は、シリンダー径  $D=135$  mm, クランク半径  $r=65$  mm, コンロッド長さ  $l=230$  mm, 圧縮比  $\epsilon=15$ , 機関回転数は 1600 rpm, 吸気温度  $T_i=430$  K, 燃焼室壁温  $T_w=373$  K, 供試燃料は  $C_8H_{18}$  とそれぞれ仮定した。また、燃焼条件は原則として着火時期  $T_{ig}=-5^\circ\text{ATDC}$ , 燃焼期間  $\theta_z=60^\circ\text{CA}$ , Wiebe 燃焼関数の燃焼特性数  $M=0.5$ , 空気過剰率  $\lambda=1.2$  とした。

### 3. 計算結果と考察

#### 3.1 各種燃焼条件がトルクハーモニックスに及ぼす影響

##### 3.1.1 着火時期 $T_{ig}$ の影響

図1と図2に、着火時期 Tig を変えた場合の筒内ガス圧力 P、トルク T' 及びトルクハーモニクス  $S_n$  をそれぞれ示す。図に見られるように、Tig の遅延に伴って P 及び T' の最大値がいずれも減少するが、その場合筒内最大圧力  $P_{max}$  の減少程度が大きいのに対して T' の最大値の減少程度は小さくなっている。一方、 $S_n$  については着火時期による差異を別として、全般的にみると、次数  $N=1.25$  程度に  $S_n$  の最大値が在存し、とくに次数  $N$  がそれ以上に増加すると  $S_n$  は大巾に減少する特性が得られる。この特性は、以後に述べるように、燃焼条件を各種変えた場合にもほぼ同様に見られる。

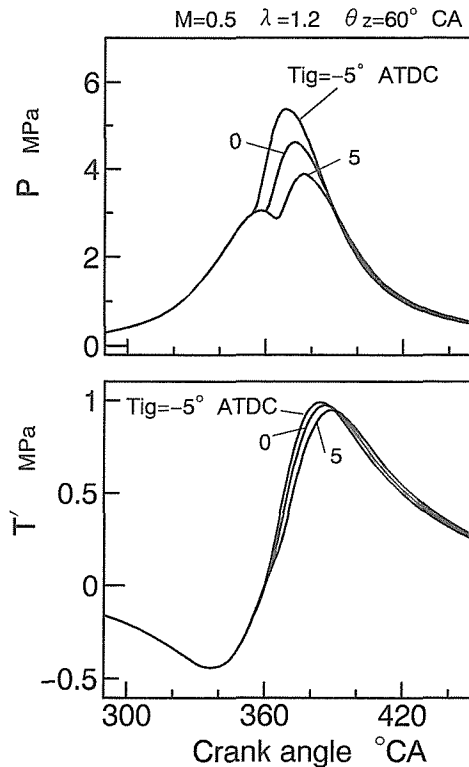


図1 Tig を変えた場合のインジケータ線図とトルク変動

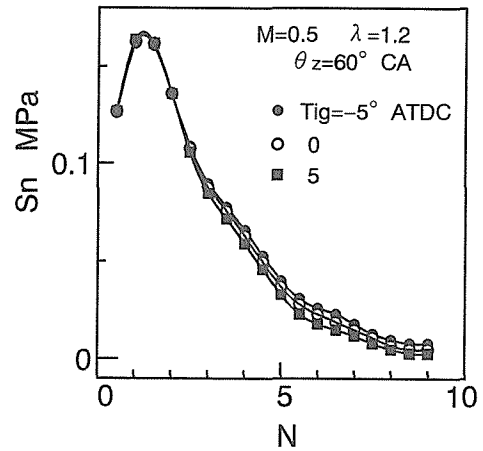


図2 Tig を変えた場合の  $S_n$

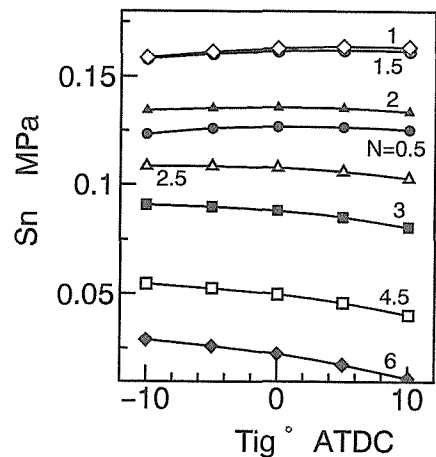


図3 Tig と  $S_n$  との関係

Tig と  $S_n$  との関係については、Tig の遅延による  $P_{max}$  の減少にもかかわらず、 $N=0.5\sim 2.0$  における  $S_n$  の変化は比較的小さいが、 $N>2$  での  $S_n$  は明らかに減少していることが分かる。ここで、更に詳しく Tig と  $S_n$  との関係を検討した結果を図3に示す。図より、Tig の遅延によって、 $N<2$  の  $S_n$  は増加傾向が明瞭に認められ、一方、 $N\geq 2$  における  $S_n$  の減少程度は  $N$  が増加するほど著しいことが明かである。即ち、近年、排出  $NO_x$  濃度を低下させるために、着火時期の大巾遅延が行われているが、その場合には  $N>2$  の高周波ハーモニクスは減少するが、 $N<2$  の低周波ハーモニクスは若干ではあるが増加する。

Tig の遅延による低周波  $S_n$  の増加は、 $T'$  の最大値が遅延すると同時に、膨張行程後期での  $T'$  が高い値になることから、またその際の高周波  $S_n$  の減少は  $T'$  の最大上昇速度が Tig 遅延に伴って増加することからもそれぞれ推定することが出来よう。なお、過度の着火時期遅延は、熱効率ならびに平均有効圧  $P_{mi}$  をそれぞれ悪化させることは言うまでもない。

### 3. 1. 2 燃焼期間 $\theta_z$ の影響

図4～図6に、 $\theta_z$  を変えた場合の  $P$ 、 $T'$  及び  $S_n$  をそれぞれ示す。図において、 $\theta_z$  の増加に伴い  $P_{max}$  及び  $T'$  の最大値が減少することから、 $\theta_z$  の増加は  $P$ 、 $T'$  及び  $S_n$  に対して前述の Tig 遅延とはほぼ同様な影響を及ぼす。即ち、 $\theta_z$  の増加にともなって、 $N > 2$  の高周波  $S_n$  は減少しているが、 $N \leq 1.5$  の低周波  $S_n$  は  $\theta_z$  が  $40 \sim 80^\circ \text{CA}$  の範囲で若干増加するにとどまり、その程度は Tig を変えた場合の変化に比べて若干小さくなっている。この場合も、 $\theta_z$  の増加によって、 $T'$  が最大となるクランク位置の遅延にともない低周波  $S_n$  は増加し、また  $T'$  の最大上昇速度の減少で高周波  $S_n$  が低下しているのが分かる。なお、着火時期の一定の下では燃焼期間  $\theta_z$  の増加で熱効率及び平均有効圧  $P_{mi}$  は減少する。

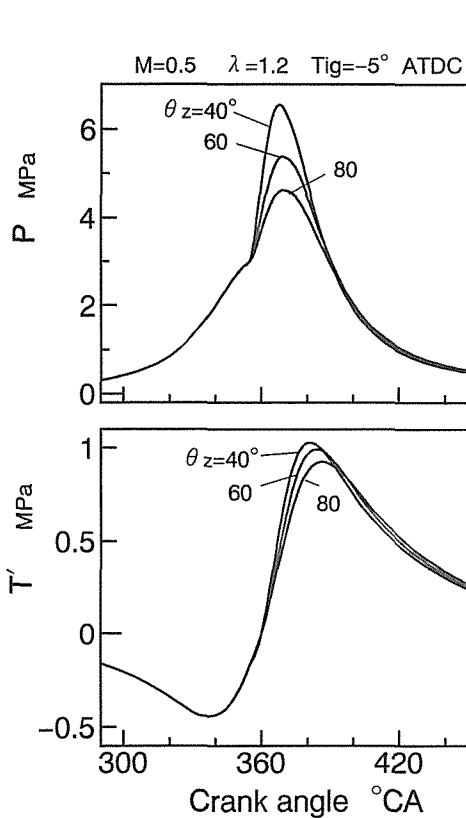


図4  $\theta_z$  を変えた場合のインジケータ線図とトルク変動

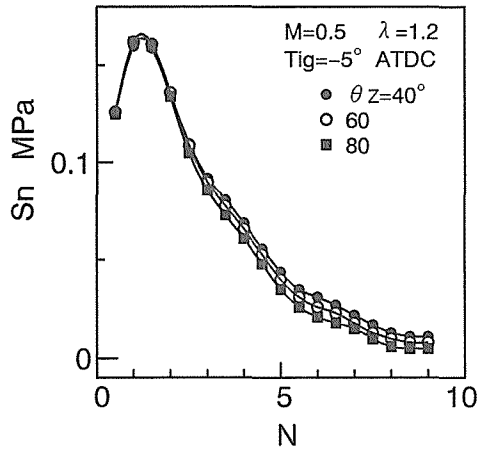


図5  $\theta_z$  を変えた場合の  $S_n$

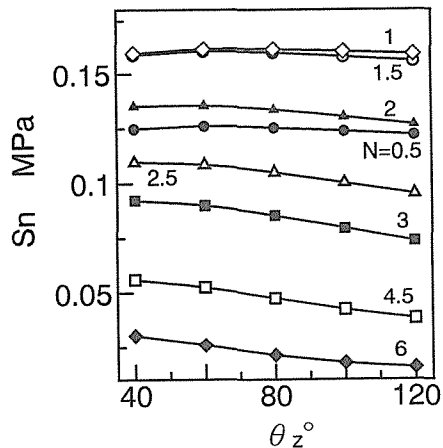


図6  $\theta_z$  と  $S_n$  の関係

### 3. 1. 3 燃焼特性値 M の影響

燃焼特性値 M は Wiebe 燃焼関数の形状を決めるパラメータであって、M の増加によって初期の燃焼率が緩和されると同時に、最大燃焼率の位置が燃焼後期に移動する。M が増加した際の P、T' 及び  $S_n$  も前述の Tig 遅延時とほぼ同様の挙動を示すが、ここでは  $S_n$  についてのみ図 7 に示す。M の増加に伴って、 $N < 2$  以下の低周波  $S_n$  は増加し、 $N \geq 2$  の高周波  $S_n$  は減少している。

### 3. 1. 4 空気過剰率 $\lambda$ の影響

本計算では、ディーゼル機関を想定しているため、シリンダ内に導入される空気量は終始変わらない。したがって、 $\lambda$  の変化は燃料量或いは負荷の変化を意味している。図 8～図 10 に、 $\lambda$  を変えた場合の P、T' 及び  $S_n$  を示すが、 $\lambda$  の変化に伴うそれらの変化が非常に大きいことが分かる。即ち、図 10 に見られるように、 $\lambda$  の減少或いは  $P_{mi}$  の増加に伴って、次数 N の如何に拘らず  $S_n$  は著しく増加する。この場合、 $\lambda$  の減少により高・低周波数での  $S_n$  が共に高くなるのは、T' の最大上昇速度ならびに膨張行程後期の T' が増加することからも十分推定出来るが、一方平均有効圧  $P_{mi}$  が高くなることにも関連するものと考えられる。

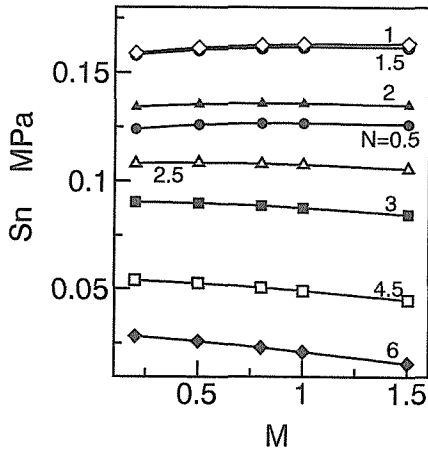


図 7 M と  $S_n$  との関係

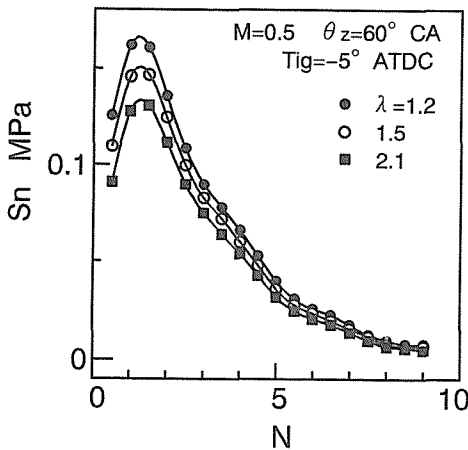


図 9  $\lambda$  を変えた場合の  $S_n$

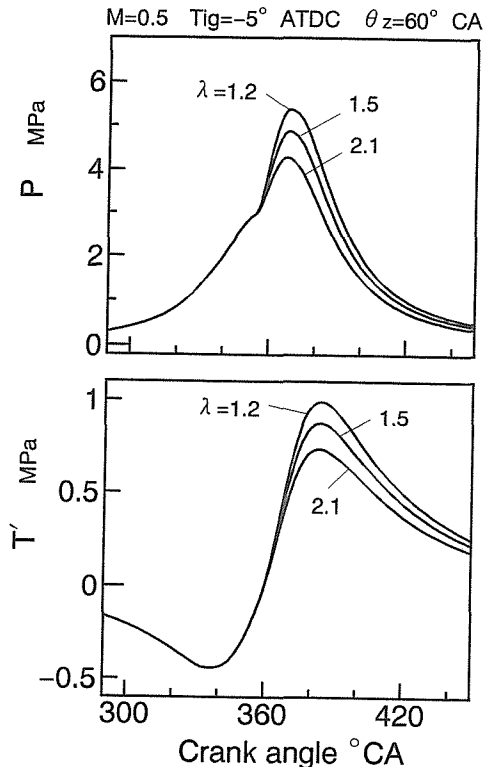


図 8  $\lambda$  を変えた場合のインジケータ線図とトルク変動

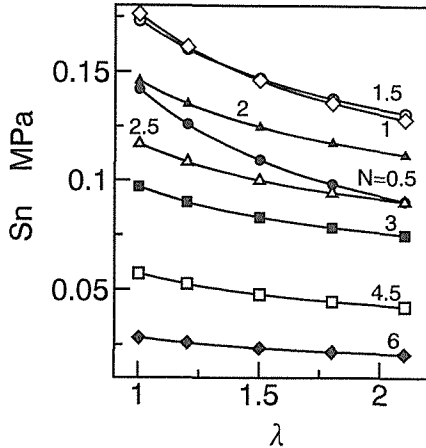


図10 λとSnとの関係

表-1 係数

| N   | a     | b(MPa) |
|-----|-------|--------|
| 0.5 | 0.136 | 0.0467 |
| 1.0 | 0.126 | 0.0880 |
| 1.5 | 0.112 | 0.0954 |
| 2.0 | 0.090 | 0.0831 |

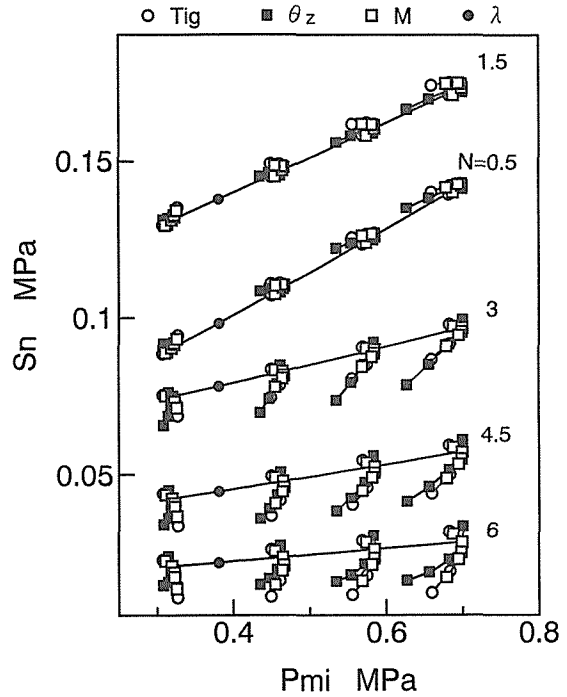


図11 PmiがSnに及ぼす影響

そこで、 $P_{mi}$ と $S_n$ との関係を調べた結果を図11に示す。なお、図中には、 $\lambda$ のほかにTig、 $\theta_z$ 、Mを大中に変えた際のデータも同時にプロットしてある。

この結果から次のことが言える。即ち、

(1)  $N < 2$ の $S_n$ は、Tigなどの燃焼条件が変化したとしてもそれらに大きく影響されることなく、概ね $P_{mi}$ の一次関数として次式の様に記述される。

$$S_n = a \cdot P_{mi} + b \quad (\text{MPa})$$

ただし、係数a、bは表1に示す通りである。

(2) 一方 $N \geq 2$ の $S_n$ は、 $P_{mi}$ の増加によって概ね増加するものの、Tigなどの燃焼条件によっても大きく影響されるので、 $P_{mi}$ のみでは記述できない。尚、従来 $S_n$ は $P_{mi}$ によってほぼ決定されると言われてきたが、それは低周波の $S_n$ に限定されるものと言える。

### 3.2 インジケータ線図の形状特性値とトルクハーモニクスとの相関

内燃機関では、筒内圧力経過即ちインジケータ線図によって、その燃焼状況の把握と評価を行うことが多い。したがって、インジケータ線図における何らかの形状特性値によってトルクハーモニクスの評価が出来れば、実用上有効であろう。そこで本稿では、形状特性値として筒内最大圧力 $P_{max}$ 、最大圧力上昇率 $(dP/d\theta)_{max}$ 、最大圧力上昇加速度 $(d^2P/d\theta^2)_{max}$ について検討した。

#### 3.2.1 各形状特性値に対する相関

Tigを変えた場合、ならびに $\lambda$ を変えた場合の $P_{max}$ 、 $(dP/d\theta)_{max}$ 及び $(d^2P/d\theta^2)_{max}$ と $S_n$ との相関係数を図12と図13にそれぞれ示す。Mならびに $\theta_z$ を変えた場合の相関係数は、Tigを変えた場合と類似しているためここでは省略する。Tigを変えた場合の相関係数について見ると、 $P_{max}$ 、 $(dP/d\theta)_{max}$ 及び $(d^2P/d\theta^2)_{max}$ は、 $N \leq 2$ の $S_n$ に対して0或いは弱い負の相関を示してはい

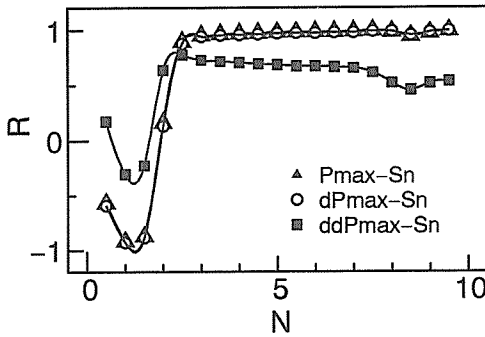


図12 インジケータ線図の形状特性値と  $S_n$  との相関 (Tig を変えた場合)

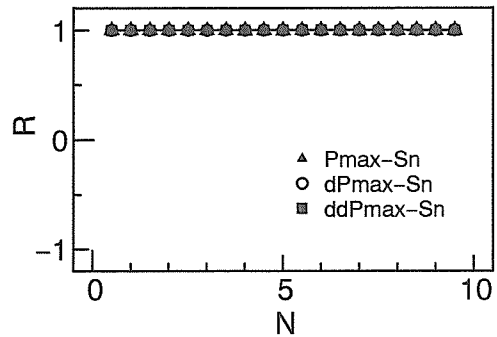


図13 インジケータ線図の形状特性値と  $S_n$  との相関 ( $\lambda$  を変えた場合)

るが、その相関は必ずしも明瞭ではない。一方  $N > 2$  の高次数  $S_n$  は形状特性値に対して強い正の相関を有しており、中でも  $P_{max}$  及び  $(dP/d\theta)_{max}$  との相関が高いことが分かる。なお、これは  $P_{max}$  と  $(dP/d\theta)_{max}$  とが同一傾向で変化することに依存しているものと思われる。

一方、 $\lambda$  即ち  $P_{mi}$  を変えた際の相関を図13に示すが、 $P_{max}$ 、 $(dP/d\theta)_{max}$ 、 $(d^2P/d\theta^2)_{max}$  は、いずれの次数においても  $S_n$  との相関は極めて強く、相関係数  $R \approx 1$  となっている。つまり、いずれの燃焼条件が変わった場合であっても、 $N > 2$  の高周波  $S_n$  は  $P_{max}$  或いは  $(dP/d\theta)_{max}$  に対する相関が高いことから、これら二つの形状特性値によって高周波の  $S_n$  は相対的に評価し得るものと言える。

3. 2. 2 形状特性値を総合した相関

$\lambda$  を一定して、Tig、 $\theta_z$ 、M を全て変化させた際の  $P_{max}$ 、 $(dP/d\theta)_{max}$  及び  $(d^2P/d\theta^2)_{max}$  と  $S_n$  の相関係数を図14に示す。この場合の相関は一つの燃焼条件を変えた場合のものではなく、各種の燃焼条件を総合した相関であるので、インジケータ線図の形状特性値と  $S_n$  との相関を一層明確に示すものと考えられる。

図に見られるように、三つの形状特性値は  $N \geq 2.5$  の高周波  $S_n$  に対して正の相関を有し、 $N < 2.5$  の低周波  $S_n$  に対しては0或いは負の相関を呈するが、いずれの  $S_n$  も  $P_{max}$  との相関が著しく、 $(dP/d\theta)_{max}$  そして  $(d^2P/d\theta^2)_{max}$  の順に相関が低くなる。

低周波での相関に比べて、高周波の相関係数  $R$  が絶対値として高いことから、特に高周波での  $S_n$  については  $P_{max}$  による評価がある程度可能と言えよう。

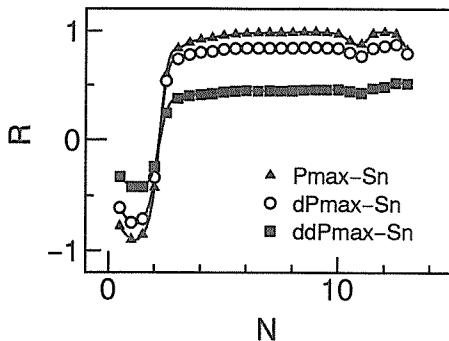


図14 インジケータ線図の形状特性値と  $S_n$  との相関

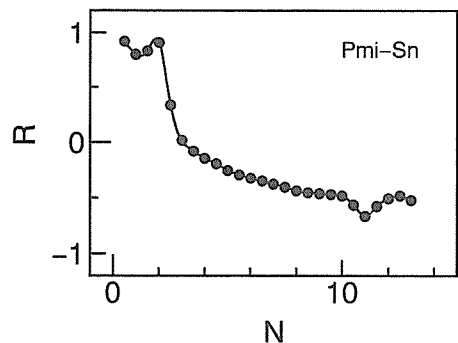


図15  $P_{mi}$  と  $S_n$  との相関

なお、図 15 に示すように、特に  $N < 2$  の低次数  $S_n$  については、すでに述べたように  $P_{mi}$  との相関がきわめて高い。

#### 4. 結 論

本研究では、各種燃焼条件及びインジケータ線図の形状特性値が燃焼筒内圧力に起因するトルクハーモニックスに及ぼす影響について解明を試みた。以下に、得られた結果を要約する。

1)  $N < 2$ 、即ち機関回転の 2 次以下の低周波トルクハーモニックスは、燃焼条件によると言うよりは平均有効圧に集約されて決定され、その増加によりハーモニックスは直線的に増加する。一方  $N \geq 2.0 \sim 2.5$  の高周波トルクハーモニックスは燃焼条件によっても大きく影響される。

2) 高周波の次数トルクハーモニックスに対しては、筒内最大圧力が最も支配的で強い正の相関を与え、次いで筒内の最大圧力上昇率、また最大圧力上昇加速度の順に相関が低くなる。

3) 低周波のトルクハーモニックスに対して、筒内最大圧力は負の相関を若干示すものの、その相関は強くはない。

4) 着火時期の遅延、燃焼期間の増加、並びに初期燃焼率の低下に伴って、低周波のハーモニックスは若干ながら増加の傾向を示す場合があるが、高周波成分は明瞭に減少する。

#### 参 考 文 献

- 1) Sitkei, G., Kraftstoffaufbereitung und Verbrennung bei Dieselmotoren, (1964), Springer-Verlag
- 2) Woschni, G., MTZ, 26-4, (1964), 128
- 3) 宮本 登他, 日本機械学会論文集, 38-308, (昭和 47), 865
- 4) Reisacher, J., MTZ, 27-10, (1966), 411